

3. Bilancio idrologico del bacino di Pantano – Venerocolo e bilancio di massa del Ghiacciaio “debris covered” del Venerocolo (Gruppo dell’Adamello)

1. Introduzione

La presente parte del lavoro concerne il Ghiacciaio del Venerocolo, l’unico debris covered Glacier propriamente detto della Lombardia. Esso ricopre 1,2 km² ed è situato alla base della parete nord dell’Adamello, nella Val d’Avio, una valle laterale della Val Camonica.

Tale ghiacciaio è caratterizzato da due piccoli bacini di accumulo alla base del Monte Adamello e da una lingua d’ablazione coperta di detrito.

Nell’ambito del dottorato, chi scrive ha partecipato alla valutazione del bilancio idrologico (anni 2006-2009) per il bacino del Venerocolo, che viene illustrato nel lavoro di Bocchiola et al. (2010), in allegato. Si illustra qui il bilancio di massa del Ghiacciaio del Venerocolo. L’area del bacino del Pantano – Venerocolo è una zona particolarmente ricca di dati meteorologici presso le stazioni meteorologiche di supporto a dighe e centrali dell’ENEL, ma non è una zona largamente studiata dal punto di vista glaciologico e idrologico. In Bocchiola et al. (2010) è stata calcolata la fusione del ghiaccio attraverso un modello *degree-day* puro (*i.e.* senza considerare la radiazione), ove il *degree-day factor* dipendeva dalla copertura detritica, analogamente a quanto esposto in seguito.

La particolarità dei debris covered glaciers consiste nel fatto che la copertura detritica influenza l’ablazione. In particolare è lo spessore del detrito la variabile più influente, soprattutto per spessori piccoli (in genere tra i 2 e i 5 cm: questo *range* dipende da litologia, porosità, contenuto d’acqua e altre caratteristiche del detrito). L’ablazione sotto un certo spessore detritico è superiore all’ablazione su ghiaccio pulito, mentre per spessori maggiori di quello critico aumenta. Pertanto, l’ablazione graficata rispetto allo spessore detritico assume una forma a campana, del tipo funzione Gamma (Bocchiola et al., 2010) o log-normale, mentre a spessori detritici via via maggiori assume un andamento asintotico. Questo concetto viene applicato nei modelli di fusione glaciale sotto la copertura detritica. Qui, ho dapprima studiato l’ablazione superficiale per fusione sotto la copertura detritica attraverso un modello *degree-day* modificato (per esempio, Braithwaite, 1984) in cui si

considerano, oltre alla temperatura, anche la radiazione solare incidente e la copertura detritica (si veda per esempio Hock, 2005; Williams and Tarboton, 1999).

Quindi ho studiato l'ablazione al di fuori del detrito attraverso modelli *degree-day* modificati e infine ho distribuito l'equivalente idrico nivale, necessario anch'esso per definire il bilancio di massa del Ghiacciaio del Venerocolo.

Nei modelli qui descritti il fattore di fusione MF assume anch'esso una forma a campana, se plottato rispetto allo spessore detritico. Nonostante la minore accuratezza dei modelli *degree-day* rispetto ai modelli energetici e fisicamente basati distribuiti, i modelli *degree-day* necessitano di pochi parametri, in questo caso solo temperature dell'aria, radiazione, mappa supraglaciaie della copertura detritica e il DEM del ghiacciaio che fornisce quota, esposizione e pendenza, e possono fornire risultati accurati e fisicamente basati (Ohmura, 2001).

3.1 Modellazione dell'ablazione superficiale

1. Materiali e metodi utilizzati

Per lo studio dell'ablazione supraglaciaie sono stati utilizzati i dati meteorologici della stazione di ARPA Lombardia di Pantano d'Avio di temperatura dell'aria, radiazione solare, precipitazioni e altezza del manto nevoso.

La temperatura dell'aria è stata calcolata giornalmente per ogni punto del modello (Tap) sul ghiacciaio tramite un gradiente lineare di temperatura di $-0,0104$ °C /m tra la temperatura della stessa stazione di Pantano e della stazione meteorologica supraglaciaie presente nella parte centrale della lingua coperta di detrito del Venerocolo nell'estate 2007 come nella seguente:

$$T_{ap} = T_{aAWS} - 0,0104 * (z - z_{AWS}),$$

in cui T_{aAWS} è la temperatura alla stazione meteo di Pantano per ogni giorno, z la quota di ciascun punto e z_{AWS} la quota dell'AWS di Pantano.

La radiazione solare incidente in ogni punto, ad ogni ora, e ogni giorno SW_{in} è stata calcolata attraverso la seguente formula:

$$SW_{in}(p) = SW_{in}(pt) * SW_{in}(AWS) / SW_{in}(tAWS)$$

In cui $SWin$ (pt) è la radiazione teorica in quel dato punto del modello, $SWin$ (AWS) è la radiazione misurata dalla stazione meteorologica di Pantano d'Avio, mentre $SWin$ (tAWS) è la radiazione teorica calcolata a Pantano d'Avio.

La radiazione solare teorica è stata calcolata per ogni ora e poi mediata sulle 24 ore.

È stato utilizzato un DEM della Regione Lombardia del 1982, pertanto le quote del ghiacciaio risultano leggermente sovrastimate, a causa della fusione avvenuta nel frattempo, con risoluzione 10 m x 10 m.

Dal 2007 al 2009 sull'area coperta di detrito per quantificare la fusione supragliaciale sono state posizionate fino a 11 paline ablatometriche, su spessori detritici tra i 2 e 20 cm circa. Le paline ablatometriche sono state misurate più volte l'anno e ripiantate, pertanto si posseggono dati di ablazione per più periodi nel corso dell'anno. E' possibile quindi investigare la variazione temporale dell'ablazione e dei fattori di fusione. Le misurazioni sono state effettuate dal 12 Giugno al 12 Ottobre 2007 e dal 10 Agosto al 24 Ottobre 2008, ed utilizzate per calibrare i modelli e dall'8 Luglio al 23 Settembre 2009.

Per la mappa del detrito sono stati utilizzati dati di copertura detritica raccolti in tutta l'area coperta di detrito (alcune migliaia di punti), misurati manualmente specialmente lungo transetti longitudinali e trasversali tra una palina e l'altra, ma anche distribuiti in tutta la zona *debris covered*.

Gli spessori detritici (vedi figura 1) sono compresi tra i 0 cm in zone di falesia ad alta pendenza fino al metro in aree caratterizzate da massi e sono nella mappa mediati su aree di 100 m². Mediamente si hanno spessori di 20-30 cm.

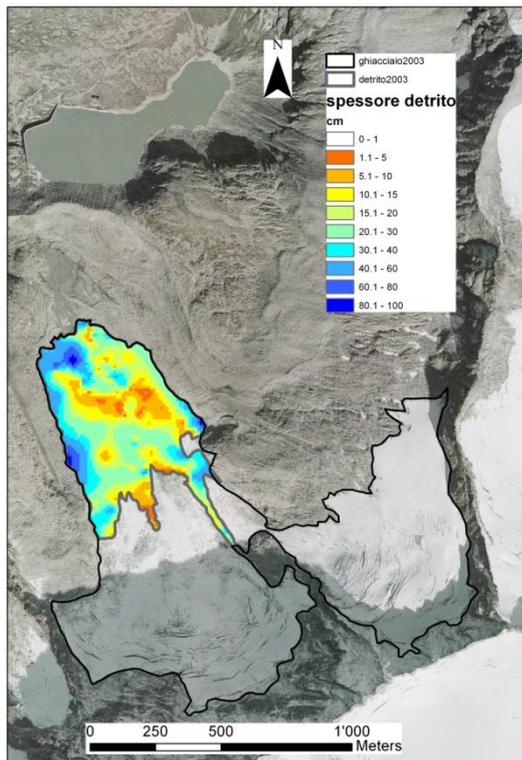


Fig 1: mappa della copertura detritica.

1.1 Modello per l'ablazione sotto il detrito

Ho applicato un modello *degree-day* modificato, che considera la temperatura dell'aria e la radiazione solare incidente. In questo caso, non ho misurato l'albedo spazialmente distribuita sul ghiacciaio, ma nel periodo in cui la stazione meteorologica automatica era in funzione (da Agosto ad Ottobre 2007) non vi erano sostanziali variazioni a frequenza giornaliera di albedo pertanto è stato assunto costante nel tempo e nello spazio.

In generale I tre modelli sotto presentati calcolano l'ablazione M come segue:

$$M = a T_{\text{air pixel, date}} \text{ TMF}_{\text{pixel}} + b \text{ RMF}_{\text{pixel}} \text{ SWin}_{\text{pixel, date}} + A_0$$

dove $T_{\text{air pixel, date}}$ e $\text{SWin}_{\text{pixel, date}}$ sono la temperature dell'aria e la radiazione solare incidente e sono calcolati per ogni giorno e per ogni punto del modello. La temperatura è stata calcolata con un gradiente di quota costante nel tempo.

La radiazione è stata calcolata in funzione della radiazione teorica di ciascun punto (Ohmura, 1969, in analogia a come è stata applicata da Hock, 1999) e della radiazione teorica della stazione meteorologica di Pantano d'Avio di ARPA Lombardia.

I valori $PTMF_{pixel}$ e RMF_{pixel} sono i “positive temperature melting factor”, ovvero i fattori di fusione di temperatura positiva and il fattore di fusione della radiazione e sono calcolati in funzione dello spessore detritico DT con la seguente funzione Gamma riscalata e traslata:

$$MF_{pixel} = S_d \cdot \left[\frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{DT + D_0}{\beta} \right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{DT + D_0}{\beta} \right)} \right] + D_\infty$$

Dove S_d è un fattore di scala, α e β sono i parametri della funzione Gamma, D_0 è un parametro di *shifting* usato per tenere conto del fattore di fusione del detrito nudo e D_∞ indica il fattore di fusione per coperture detritiche rilevanti (ovvero $DT > 15$ cm circa qui) coperture detritiche.

a, b e A_0 sono parametri risolti iterativamente massimizzando il coefficiente di Nash e Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) nella seguente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (M_m - M_c)^2}{\sum (M_m - M_{m,m})^2}$$

dove M_m è la fusione misurata, M_c è la fusione calcolata e $M_{m,m}$ è la fusione media misurata.

I seguenti modelli saranno calibrati con i dati di fusione estiva superficiale delle estati 2007 e 2008 e saranno validati con i dati dell'estate 2009.

Ho applicato in questo lavoro tre modelli:

- periodi separati
- tempo parabola
- periodo unico

1.1.1 Calibrazione dei modelli:

Metodo “periodi separati”

Nel metodo periodi separati i fattori di fusione TMF e RMF vengono calcolati per ciascun periodo del modello: in particolare i periodi sono:

- 12/6-18/7/2007,
- 18/7-10/8/2007 e 4/7-5/8/2008
- 10/8-13/9/2007 e 4/8-11/9/2008
- 13/9-12/10/2007 e 10/9-24/10/2008

I fattori di fusione TMF_p e RMF_p sono stati calcolati per ogni palina e per ciascun periodo attraverso i dati di ablazione media e di temperatura media dell'aria positiva e di radiazione, come nella seguente:

$$TMF_p = M_{p,g} / \Sigma Ta_{p,g}, \quad \text{con } Ta > 0^\circ\text{C}$$

$$RMF_p = M_{p,g} / \Sigma SWin_{p,g}, \quad \text{con } Ta > 0^\circ\text{C}$$

Con $M_{p,g}$ tasso di fusione giornaliero della palina espresso in cm di ghiaccio, $Ta_{p,g}$ temperatura dell'aria giornaliera positiva calcolata presso la palina, $SWin_{p,g}$ radiazione solare incidente giornaliera presso la palina.

I fattori di fusione TMF e RMF sono stati calcolati in funzione dello spessore detritico facendo fittare ad una funzione Gamma, in modo da massimizzare l'indice di Nash e Sutcliffe e di rispettare il più possibile il comportamento teorico e quindi il picco di fusione a pochi cm di spessore (si veda in figura 2 e in tabella 1 un esempio per il periodo 10.8-13.9.07 e 4.8-11.9.08)

$$MF(\text{detrito}) = \{ Sd / \beta / \Gamma(\alpha) * [(DT+D0)/\beta]^{\alpha-1} * e^{-(DT+D0)/\beta} + Dinf \}$$

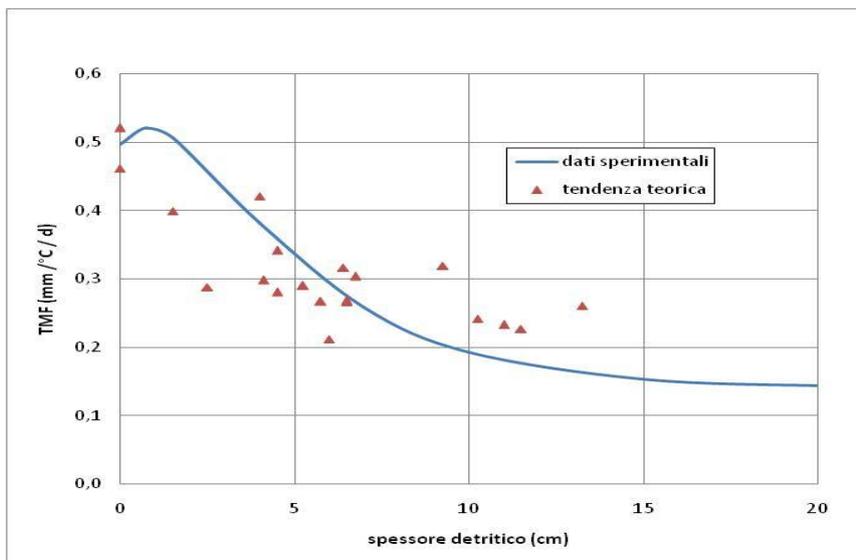


Fig 2 Andamento del TMF Ad esempio per il periodo 10.8-13.9.07 e 4.8-11.9.08

	Sd	alfa	beta	D0	Dinf
TMF	2,55	1,672138711	2,909274	1,205435294	0,141
RMF	0,10	1,20	4,30	0,11	0,005

Tab. 1 parametri calcolati per i fattori di fusione per il periodo 10.8-13.9.07 e 4.8-11.9.08

I valori così calcolati sono stati poi assemblati in un periodo unico ed è stata calcolata l'ablazione $M_{p,g}$ per ogni punto coperto di detrito e per ogni giorno come nella seguente:

$$M_{p,g} = a * TMF_{DT,pr} * Ta_{p,g} + b * RMF_{DT,pr} * SWin_{p,g} + A0$$

In cui $TMF_{DT,pr}$ e $RMF_{DT,pr}$ sono i fattori di fusione calcolati descritti in precedenza in funzione dello spessore detritico DT e del periodo pr, $Ta_{p,g}$ e $SWin_{p,g}$ sono la temperatura e la radiazione misurati in ogni punto, mentre a, b, A0 sono tre parametri ricalcolati per minimizzare lo scarto quadratico tra ablazione calcolata e misurata (tab 2), utilizzando l'indice di Nash e Sutcliffe: in questo caso r è pari a 0,94.

a	b	A0
0,300	0,573	0,219

Tab. 2 valori dei coefficienti calcolati per minimizzare lo scarto tra ablazione calcolata e misurata per il modello "periodi separati"

La relazione tra ablazione calcolata e misurata è mostrata in figura 3. I tassi di fusione inferiori si riferiscono ai periodi 13/9-12/10/2007 e 10/9-24/10/2008 durante i quali i fattori di fusione sia di temperatura che di radiazione sono pressoché costanti e dipendono poco dallo spessore detritico, pertanto l'adattamento tra calcolato e misurato non è ottimale.

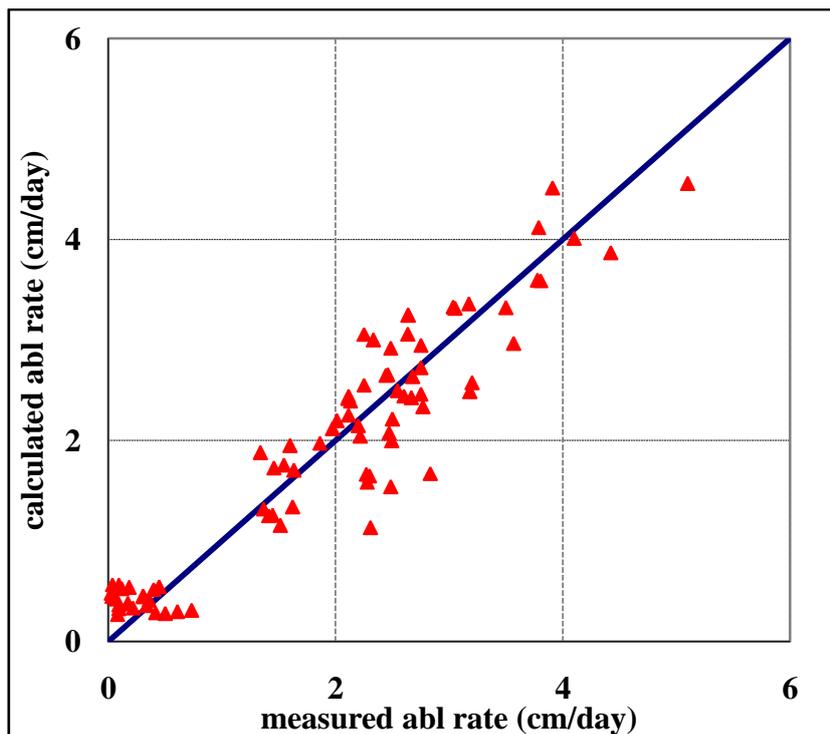


Figura 3: Tasso di ablazione glaciale misurata e calcolata

Per la distribuzione dell'ablazione sul ghiacciaio si sono utilizzati i parametri del $TMF_{DT,pr}$ e $RMF_{DT,pr}$ sono stati applicati in periodi diversi.

Metodo “periodi insieme”

Nel metodo periodi insieme sono stati utilizzati i dati medi di ablazione e meteorologici medi per le stagioni di ablazione 2007 e 2008, ovvero 12/6 - 12/10/2007 e 4/7 - 24/10/2008. Inoltre sono stati applicati tutti i criteri esposti in precedenza per l'adattamento dei fattori di fusione e della relazione tra ablazione calcolata e misurata. In questo caso l' R^2 è risultato pari a 0,73 (tab 3 e 4, figura 4). Questo è il modello *degree-day* modificato utilizzato in genere, in quanto solitamente si dispone di due sole misurazioni annuali (inizio e fine stagione) di ablazione.

	Sd	alfa	Beta	D0	Dinf
TMF	2,04	1,23	4,28	0,23	0,12
RMF	0,10	1,17	6,31	0,30	0,0029

Tab. 3 parametri calcolati per i fattori di fusione per il periodo 12/6 - 12/10/2007 e 4/7 - 24/10/2008

a	B	A0
0,250	0,321	0,651

Tab. 4 valori dei coefficienti calcolati per minimizzare lo scarto tra ablazione calcolata e misurata per il modello “periodo unico”

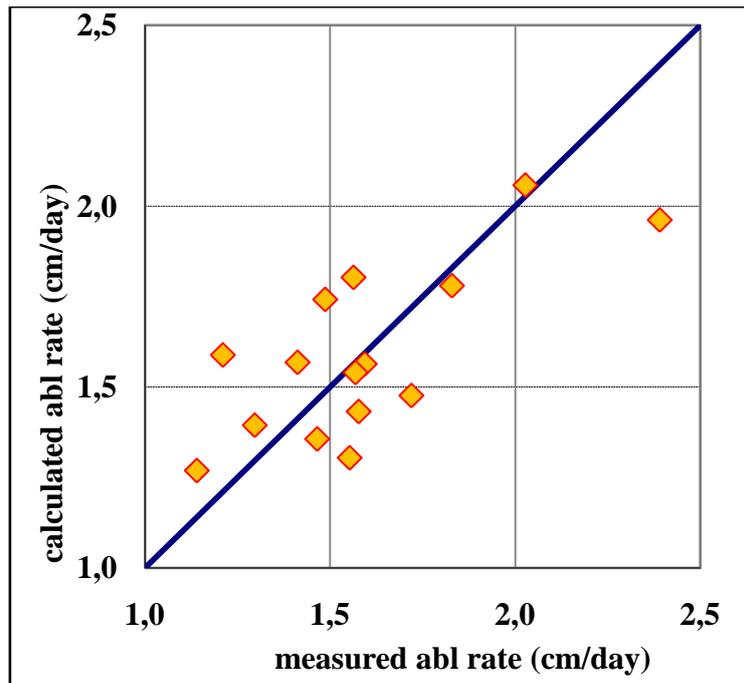


Figure 4: Tasso di ablazione glaciale misurata e calcolata per il modello “periodo unico”

Metodo “parabola nel tempo”

Per considerare la variazione del tempo dei tassi di fusione (che non viene considerata nel metodo del “periodo unico”) e per evitare il “salto” del tasso di fusione tra un periodo e l’altro (come nel metodo “periodi separati”) è stato realizzato un metodo del tipo “parabola nel tempo” in cui i fattori di fusione sono calcolati in tutto il periodo estivo, come nel metodo del periodo unico, ma vengono fatti variare in funzione del tempo t in maniera parabolica, con concavità rivolta verso il basso (figura 5).

$$MF(\text{detrito}) = \left\{ Sd / \beta / \Gamma(\alpha) * [(DT+D0)/\beta]^{\alpha-1} * e^{-(DT+D0)/\beta} + Dinf \right\} * (a*t^2 + b*t + c)/k$$

dove i tre parametri a , b , c della parabola sono calcolati per adattare la parabola ai dati medi di ciascun periodo e k è un coefficiente di riduzione.

	Sd	alfa	beta	D0	Dinf	a	b	c	k
TMF	2,04	1,50	4,30	0,17	0,12	-0,0000610	4,7962	-94208,37	0,290659824
RMF	0,12	6,79	1,25	5,26	0,0042	-0,0000028	0,2197	-4316,00	0,010840058

Tab. 5 parametri calcolati per i fattori di fusione del modello “tempo a parabola“

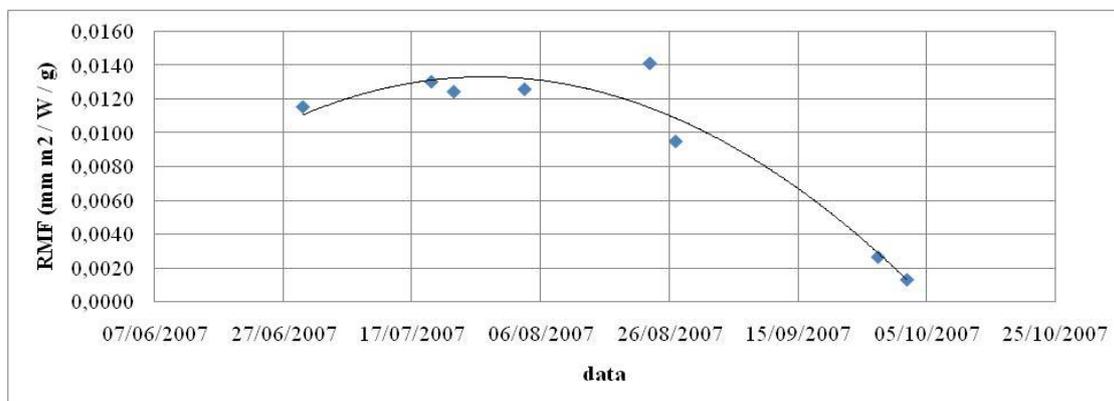


Figura 5: Andamento del tasso di fusione RMF medio per ciascun periodo in funzione del tempo. Sono stati considerati sia i dati del 2007 che del 2008 e come tempo t è stato considerato il giorno medio di ciascun periodo.

a	b	A0
0,300	0,695	0,013

tab 6 valori dei coefficienti calcolati per minimizzare lo scarto tra ablazione calcolata e misurata per il modello “tempo a parabola”

In questo caso l' R^2 è risultato pari a 0,92 (tabelle 5 e 6 e figura 6).

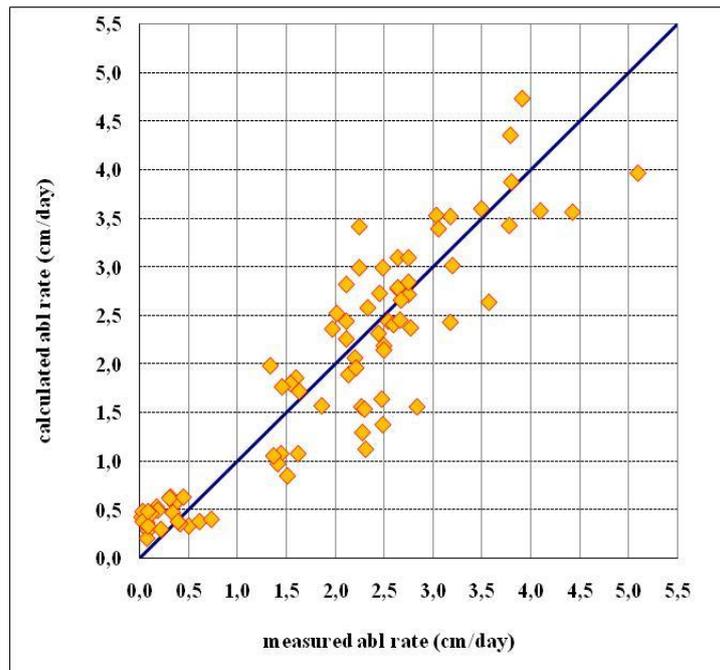


Figura 6: Tasso di ablazione glaciale misurata e calcolata

palina	2007	2008	2009	media
1	6,4	4,7	6,5	5,9
2	9,0	9,08333	8	8,7
3	7,8	7,23333	5,875	7,0
4	8,0	5,58333	3,5	5,7
5	7,6	5,25		6,4
6	4,4	4	3,25	3,9
7	4,0	1,8	3,333	3,0
8	10,5	6,75	7,333	8,2
9	8,8	9,5	11,667	10,0
10	8,1	6,33333	6,5	7,0
11	3,0	-		3,0
12	13,3	5,05	6,5	8,3
13	0,0	0	0	0,0
14	-	-	16,5	16,5
15	-	-	0	0,0
16	-	-	0	0,0

Tab. 7 Spessore detritico medio in cm presso le diverse paline nei tre anni di rilievo

Sono state rilevate discrepanze molto elevate, in media 5,5 cm in più, di spessore detritico tra la media di spessori misurati presso le paline e presso il DEM in quanto i dati del DEM si riferiscono al 2007 e ad un pixel di 100 m² e non puntuali alla palina. Pertanto si è ritenuto opportuno modificare lo spessore dei punti del DEM e associargli uno spessore detritico medio misurato presso le paline nei 3 anni (tabelle 7 e 8).

DT (cm) DEM	DT (cm) medio presso palina
5	5,9
9	7,0
19	8,7
14	5,7
6	3,9
20	8,3
21	8,3
12	6,4
5	3,0
4	3,0
12	8,2
21	10,0
9	7,0

Tab. 8 spessore detritico sul DEM e presso le paline

1.1.2 Validazione dei modelli su ghiaccio coperto di detrito.

I tre metodi descritti sono stati applicati per calcolare la fusione sopragliaciale nelle estati 2007, 2008 e 2009. Vengono mostrati i confronti tra tassi giornalieri calcolati e misurati presso le paline misurate nel 2009, in due periodi 8 Luglio – 7 Agosto e 6 Agosto – 23 Settembre e il periodo complessivo ovvero 8 Luglio – 23 Settembre.

Metodo “periodi separati”

il metodo dei periodi separati è stato applicato per periodi diversi, in particolare:

- I parametri calibrati nel periodo 12/6-18/7/2007 sono stati applicati al periodo 1/6 – 15/7 di ciascun anno

- I parametri calibrati nel periodo 18/7-10/8/2007 e 4/7-5/8/2008 sono stati applicati al periodo 16/7 – 15/8 di ciascun anno
- I parametri calibrati nel periodo 10/8-13/9/2007 e 4/8-11/9/2008 sono stati applicati al periodo 16/8 – 15/9 di ciascun anno
- I parametri calibrati nel periodo 13/9-12/10/2007 e 10/9-24/10/2008 sono stati applicati al periodo 16/9 – 31/10 di ciascun anno

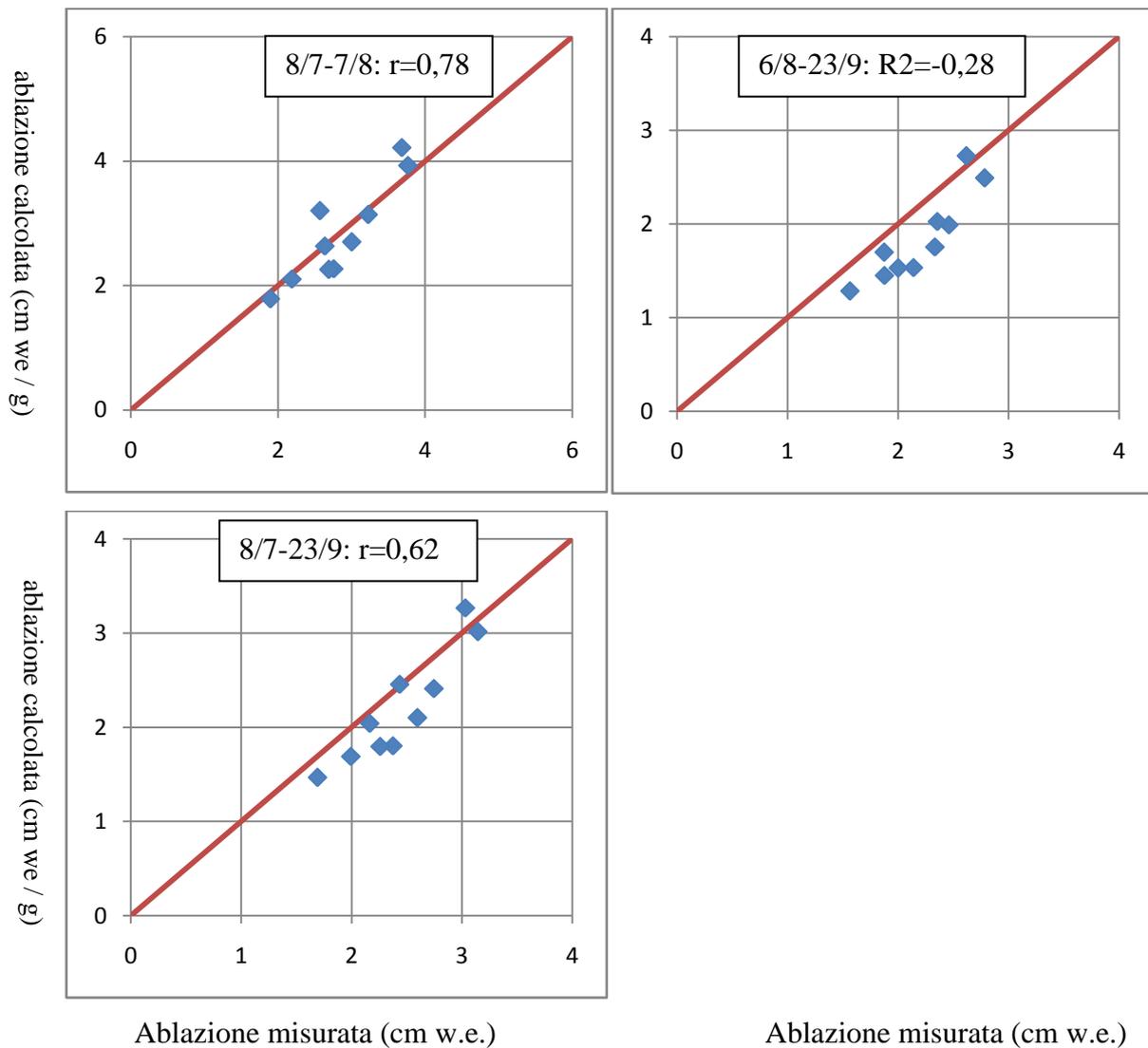


Figura 7: validazione del metodo “periodi separati”

Il metodo dei periodi separati è risultato particolarmente valido nel periodo 8/7-7/8/2009 e nel periodo estivo 2009 complessivo mostrando valori di r di 0,78 e 0,62 rispettivamente.

Nel periodo 6/8 -23/9 il modello in generale sottostima i dati misurati, e il coefficiente R^2 è di -0,28. (fig. 7)

Metodo “periodi insieme”

il metodo “periodi insieme” è nel complesso quello che ha mostrato la minore affidabilità con i dati del 2009: infatti in tutti i casi i coefficienti R^2 sono risultati negativi (fig. 8). Quando R^2 è negativo, di solito c'è una cattiva stima in media, come si vede da grafico.

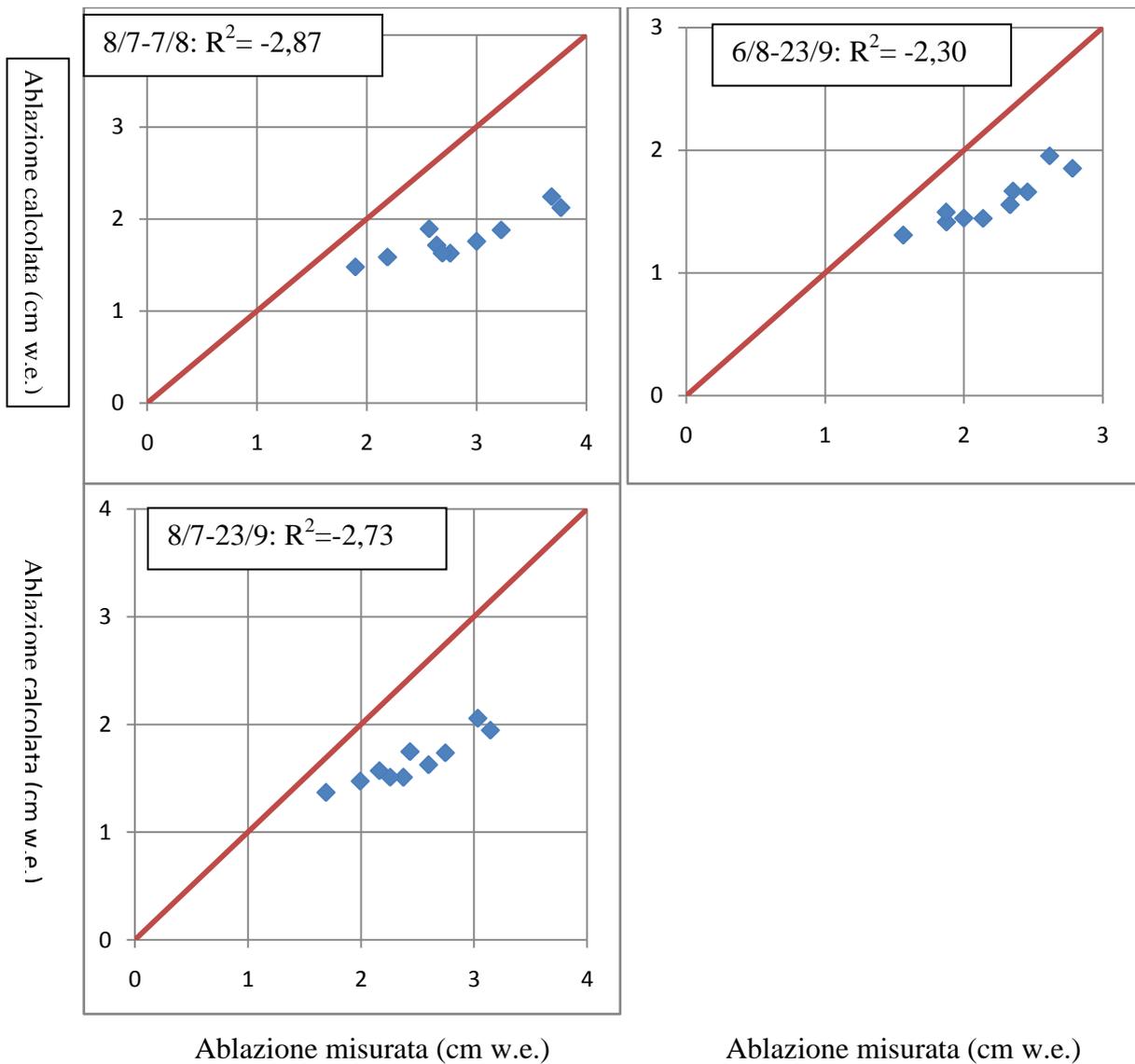


Figura 8: validazione del metodo “periodi insieme”

Metodo “tempo a parabola”

il metodo “tempo a parabola” è risultato abbastanza soddisfacente, in particolare per il periodo estivo 8/7-7/8. r basso ma positivo si ha anche per il periodo completo, mentre per il periodo 6/8-23/9 l' R^2 è risultato inferiore a zero (fig.9).

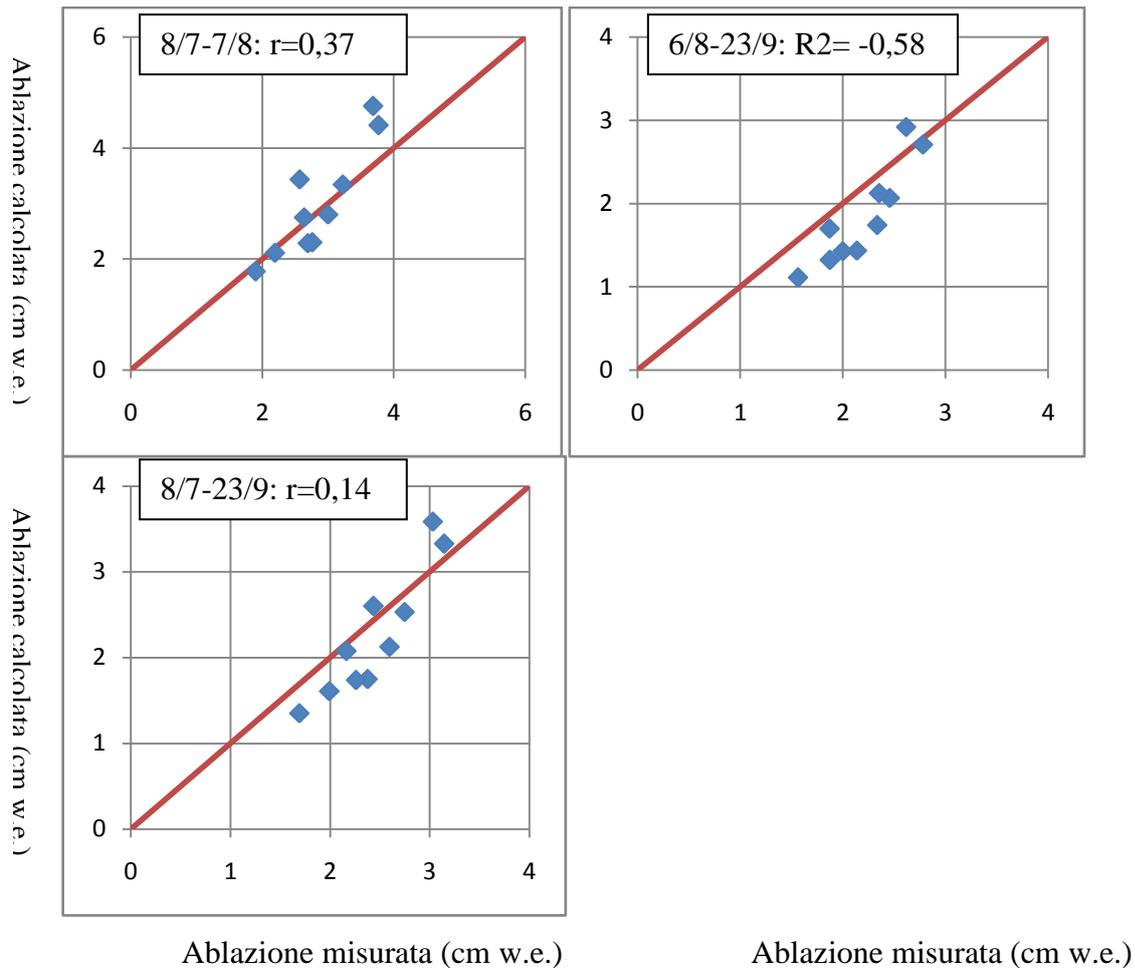


Figura 9: validazione del metodo “tempo a parabola”

In generale i metodi tempo a parabola e periodi separati hanno fornito risultati soddisfacenti. L'applicazione su un solo anno (il 2009), che è risultato abbastanza differente sotto forma dei fattori di fusione non è stato particolarmente esaustivo rispetto ai metodi presentati, pertanto è necessaria una calibrazione e validazione su più anni.

1.2 Modello per la zona non coperta da detrito

Per calibrare il modello nella zona di ghiaccio pulito ho usato tutti i dati di ablazione raccolti dal 2007 al 2009. Nel 2007 e nel 2008 è stata installata e più volte ripiantata una palina nella parte alta della lingua, nella zona centrale destra dell'area pianeggiante alla quota di 2710 m, la palina 13.

Nel 2009 sul ghiacciaio sono state installate due paline: una all'estremità inferiore della parte dell'area libera di detrito (palina 16, a 2693 m di quota), circondata da massi e ciottoli e presso una *bedières*, in destra idrografica del ghiacciaio, e un'altra, ubicata a quota altimetricamente più elevata in destra idrografica presso uno degli ultimi dossi ai piedi dell'accresta Corno Bianco - Adamello (palina 15, 2726 m s.l.m.).

1.2.1 Metodo additivo

Ho applicato due modelli degreeday modificati: il primo è analogo al modello degreeday “con tempo a parabola” applicato per la zona coperta di detrito; esso è definito additivo e MF è funzione sia della quota z che del tempo t , come segue (ad esempio Pellicciotti et al., 2005 e Carturan et al., 2012):

$$MF(z,t) = [\alpha * (z - z_0) + \beta] / \beta * (a*t^3 + a*t^2 + b*t + c)$$

in cui α è il gradiente del TMF e del RMF calcolato con la quota utilizzando le due paline nel 2009: esso è risultato particolarmente elevato, probabilmente in quanto la palina più bassa era situata vicino a *bedières* e torrentelli supraglaciali, pertanto in una posizione a fusione particolarmente elevata per quella quota, pertanto ho utilizzato il gradiente calcolato nell'estate 2001 su ghiaccio pulito nel Ghiacciaio Dosedé Orientale, che è un piccolo ghiacciaio montano, esposto a nord e con quota simile, pertanto con condizioni piuttosto simili a quelle del Ghiacciaio del Venerocolo, pertanto si è utilizzando un gradiente di TMF con la quota di -0,00434 e di -0,00015 per il RMF;

z è la quota del punto;

z_0 è la quota di riferimento, in questo caso quella della palina 13, ovvero 2710 m;

β è un coefficiente di correzione ed è pari a 0,516 per il TMF e 0,019 per il RMF e corrisponde al valore del MF a 2710 m nel giorno medio del periodo caratterizzato dalle misurazione presso le paline 15 e 16;

t è il giorno dell'anno, da 1 (1° Gennaio) a 365 (31 Dicembre);

infine i parametri a , b , c , d che esprimono il MF in funzione del tempo sono espressi nella tabella xx.

	A	b	C	d
TMF	0	-0,000154867	0,067002326	-6,624585634
RMF	-0,000000070526	0,000044039608	-0,009122185928	0,646578898123

Tab 9: coefficienti dei MF in funzione del tempo

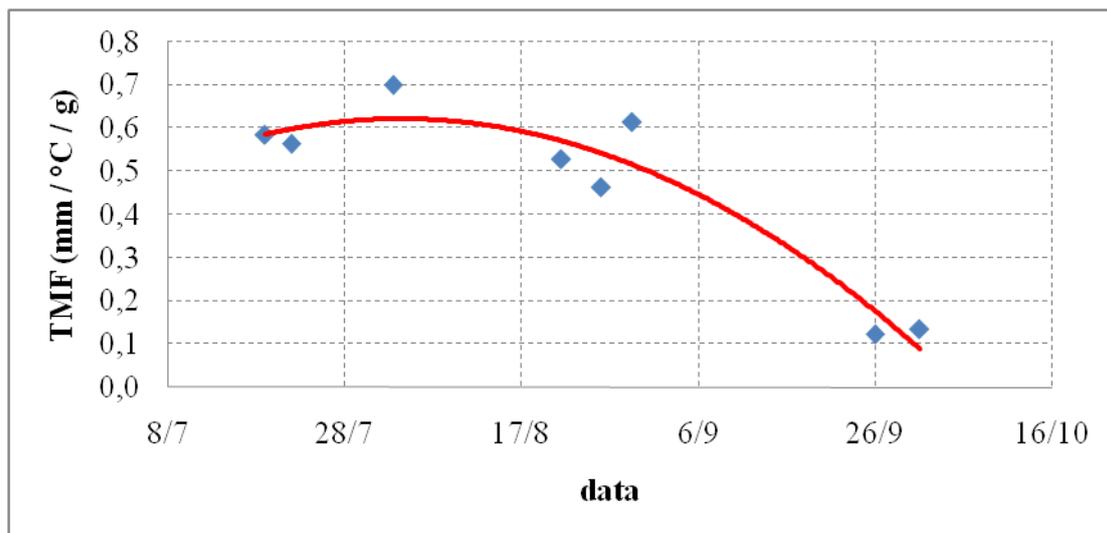


Figura 10: andamento del TMF con la data

Anche nel caso del ghiaccio pulito l'andamento dei fattori di fusione nel tempo è particolarmente significativo.

Il tasso di ablazione $M(z,t)$ (mm / g) è espresso infine dalla seguente:

$$M(z,t) = a * TMF(z,t) * Ta(z,t) + b * RMF(z,t) * SWin(x,y,z,t)$$

Anche in questo caso i parametri a, b e c sono stati calcolati in modo che il coefficiente R^2 sia massimo (in questo caso il coefficiente R^2 è risultato pari a 0,92; figura aa) e i coefficienti a e b sono mostrati nella seguente tabella ee.

a	b
0,633632759	0,4

Tab. 10: valori dei coefficienti calcolati per minimizzare lo scarto tra ablazione calcolata e misurata per il modello additivo

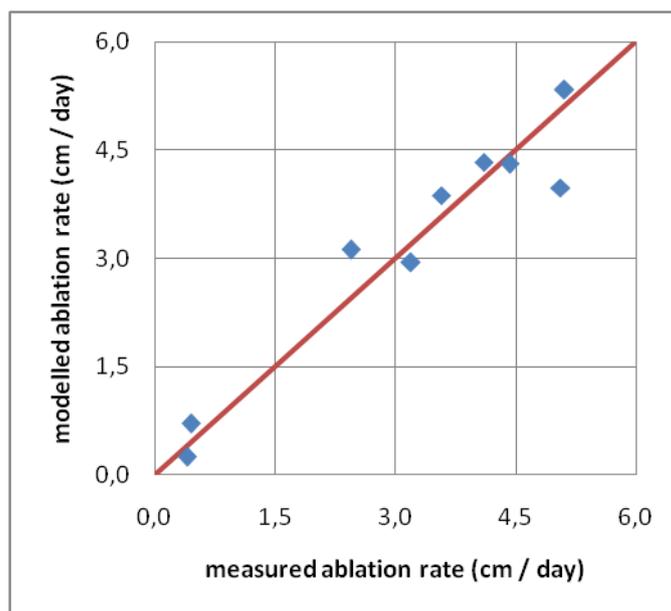


Figura 11: Tasso di ablazione misurato e calcolato con il metodo additivo

1.2.2 Metodo moltiplicativo:

nel metodo moltiplicativo invece il fattore di fusione è definito “Temperature and radiation melting factor”: infatti quest’ultimo si calcola come segue:

$$\text{TRMF} = M / (\text{Ta} * \text{SWin})$$

In accordo a Cazorzi e dalla Fontana, 1996.

Analogamente al metodo additivo

$$\text{MF}(z,t) = [\alpha * (z - z_0) + \beta] / \beta * (a * t^3 + a * t^2 + b * t + c)$$

In cui α , z , z_0 , β , a , t , b , c sono fattori analoghi a quelli del metodo additivo.

Anche in questo caso α è risultato particolarmente elevato, pertanto si è utilizzando il gradiente di TRMF con la quota di -0,00003074, che è pari a quello misurato sempre nell’estate 2011 [sul Ghiacciaio Dosedé Orientale](#);

β è stato posto pari a 0,002970759;

mentre a , b , c , d sono espressi nella seguente tabella:

a	b	c	d
-0,0000000020310	0,0000004109060	0,0001307797340	-0,0239439261710

Tab 11: coefficienti del TRMF in funzione del tempo

L’ablazione si calcola semplicemente moltiplicando il TRMF calcolato per la radiazione SWin e la Temperatura dell’aria Ta come nella seguente:

$$M(z,t) = \text{TRMF}(z,t) * \text{Ta}(z,t) * \text{SWin}(x,y,z,t)$$

In questo caso R^2 è pari a 0,93 e i valori sono sostanzialmente analoghi al metodo additivo (figura aa).

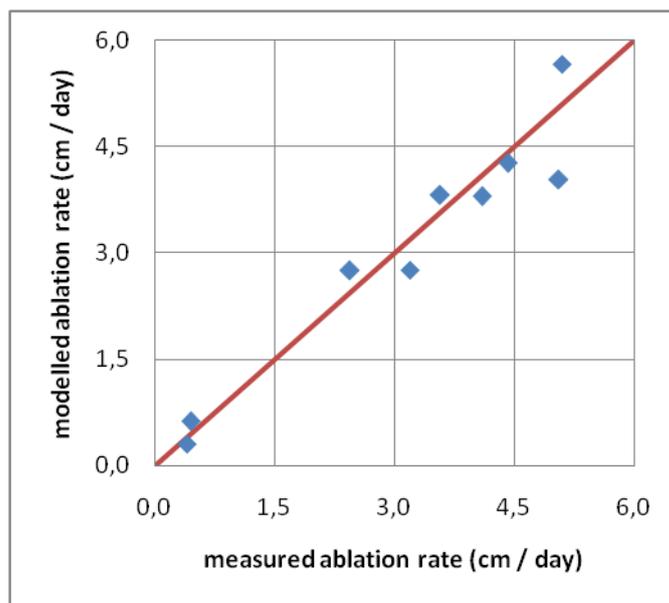


Figura 12 Tasso di ablazione misurato e calcolato con il metodo additivo

2 Risultati:

2.1 ablazione distribuita nell'area debris covered

In accordo al modello “periodi separati” l’ablazione è stata pari a una media di 134 cm w.e., da un minimo di 104 cm w.e. (valori corrispondenti alle coperture detritiche più elevate, ovvero 52 cm) ad un massimo di 379 cm w.e. (presso le coperture detritiche minori, ovvero 1-2 cm) (figura 12).

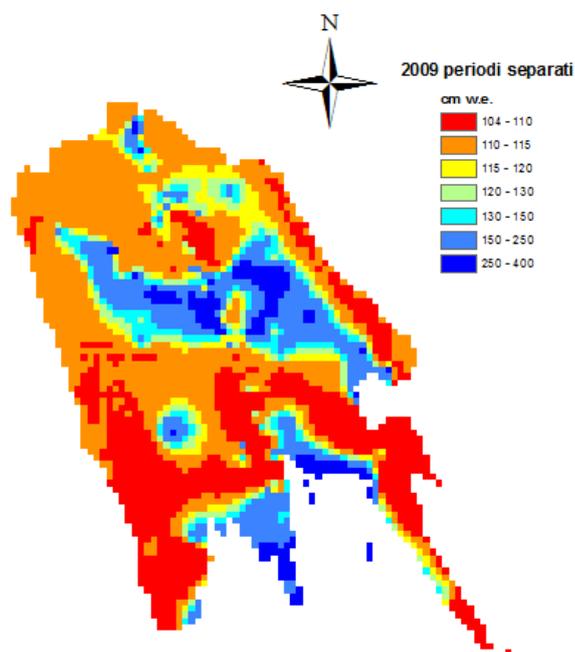


Figura 12: ablazione stagionale estiva glaciale del 2009 calcolata attraverso il modello “periodi separati”.

In accordo invece al modello “tempo parabola” l’ablazione è stata pari a una media di 115 cm w.e., da un minimo di 87 cm w.e. (valori corrispondenti alle coperture detritiche più elevate, ovvero 52 cm) ad un massimo di 383 cm w.e. (presso le coperture detritiche minori, ovvero 1-2 cm) (figura 14).

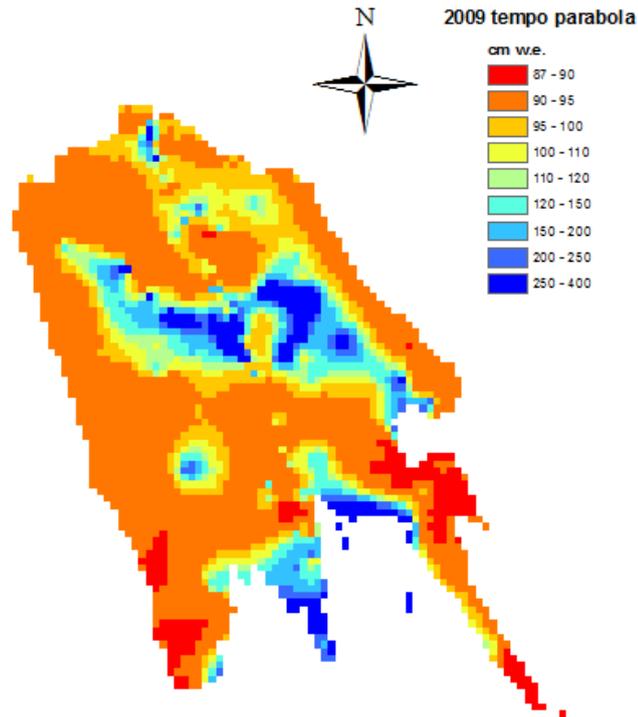


Figura 14: ablazione stagionale estiva glaciale del 2009 calcolata attraverso il modello “tempo parabola”.

Infine il modello “periodi insieme” (figura 15) calcola un’ablazione media pari a una media di 147 cm w.e., da un minimo di 125 cm w.e. (valori corrispondenti alle coperture detritiche più elevate, ovvero 52 cm) ad un massimo di 274 cm w.e. (presso le coperture detritiche minori, ovvero 1-2 cm). In generale il modello “periodi separati” presenta dei dati medi rispetto agli altri due modelli. Il modello “periodi insieme” presenta valori minori degli altri modelli presso le zone a maggiore fusione, mentre presenta valori maggiori nelle zone a bassa fusione, risultando più omogeneo. Il modello “tempo parabola” invece manifesta una maggiore ampiezza nell’intensità di fusione registrata (maggiore scarto tra maggiore e minore).

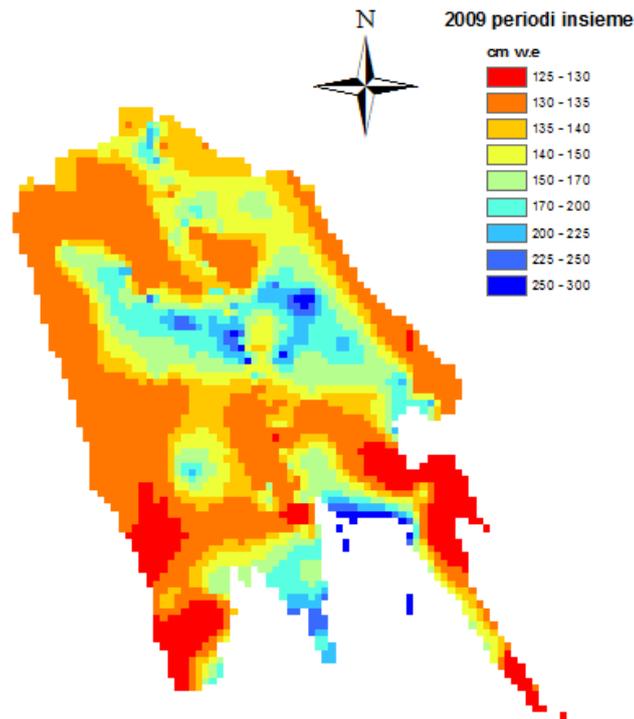


Figura 15: ablazione stagionale estiva glaciale del 2009 calcolata attraverso il modello “periodi insieme”.

Infine nella figura a lato a titolo di esempio la fusione nella stagione ablativa 2007 calcolata attraverso il modello “periodi insieme”: l’ablazione è stata mediamente inferiore rispetto al 2009, essendo compresa tra i 97 cm della parte con spessore detritico maggiore e i 357 cm dell’area a spessore detritico minore, avendo una media di 97 cm w.e., pertanto 7 cm in meno che nel 2009.

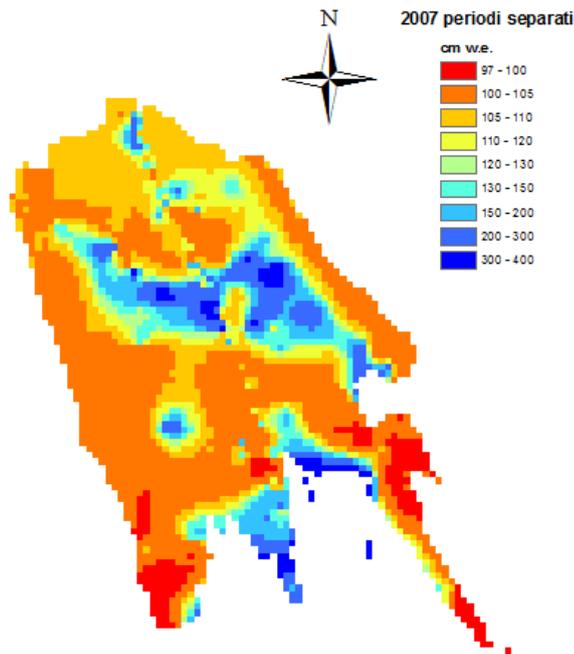


Figura 16: ablazione stagionale estiva glaciale del 2007 calcolata attraverso il modello “periodi separati”.

2.2 ablazione distribuita nell’area debris free

Vengono qui di seguito mostrati i risultati dell’ablazione supraglaciale per l’estate 2009 nell’area debris free. Il modello moltiplicativo (fig 17) calcola ha una fusione media dal 1° giugno al 31 ottobre di 66 cm w.e. e va da 374 cm w.e. a 2691 m di quota a 1 cm a 2806 m di quota, per una media nell’area che fonde di 212 cm w.e.

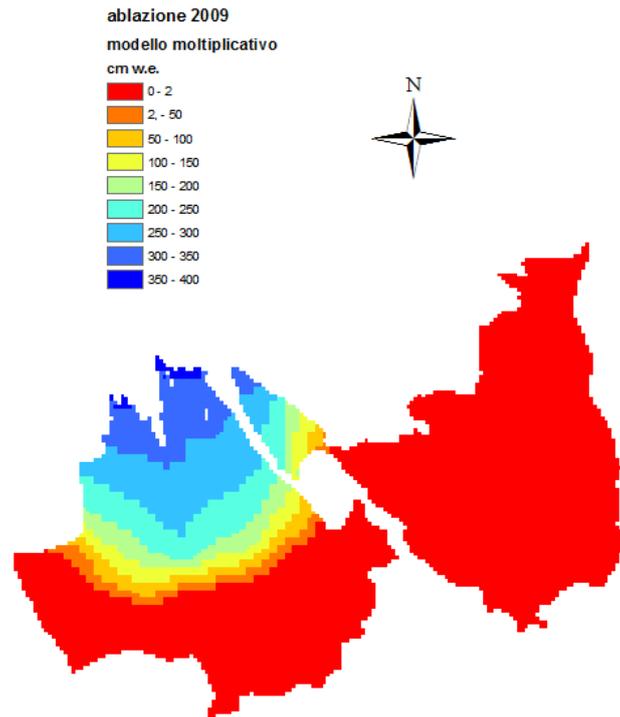


Figura 17: ablazione per l'estate 2009 su ghiaccio pulito applicando il modello moltiplicativo

Invece il modello additivo (fig 18) calcola una fusione media di 91 cm w.e. che va da 450 cm a 2691 m a 2 cm a 2830 m, con una media di 255 cm w.e. mentre nell'area in fusione. Pertanto il modello additivo calcola una differenza media di 25 cm w.e. in più. In entrambi i modelli l'area sommitale non ha subito ablazione e questo è abbastanza verosimile in quanto è sempre coperta di neve che protegge il ghiaccio dalla fusione.

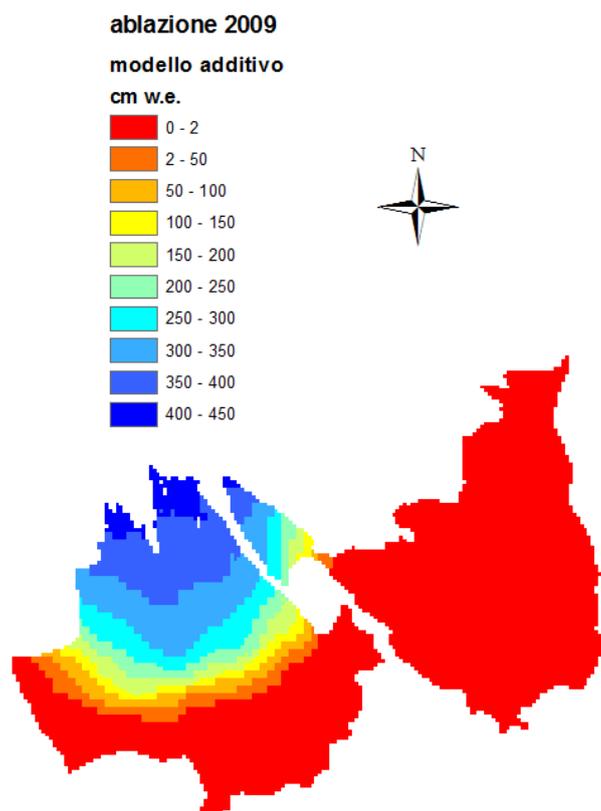


Figura18: ablazione per l'estate 2009 su ghiaccio pulito applicando il modello additivo

3.1 Distribuzione dello SWE, bilancio di accumulo e di massa

1. Materiali e metodi

In data 13.6.2008 e in data 12.6.2009 sono state effettuate alcune trincee nivologiche e vari sondaggi nevosi sulla lingua glaciale del Venerocolo.

L'equivalente idrico nivale è stato distribuito in entrambe le date con un modello misto ~~di quota~~ che ha tenuto conto sia della quota che dell'Inverse Distance Weighting Method. È stata prima di tutto calcolata la regressione dello SWE misurato presso i sondaggi nevosi con la quota, previa verifica della significatività della variabile. Successivamente sono stati calcolati i residui e questi sono stati distribuiti in funzione della distanza inversa al quadrato, infine è stato aggiunto quest'ultimo dato alla regressione in accordo alla sotto riportata formulazione:

$$\text{swe iniziale} = \text{residuo} + \text{regressione} = \text{SWE residui calcolati(PIXEL)} + \text{quota(PIXEL)} * m + q$$

In entrambe le date lo SWE è risultato significativamente correlato con la pendenza. La precipitazione e l'altezza del manto nevoso registrate alla stazione ARPA di Pantano d'Avio sono state utilizzate per la distribuzione della precipitazione sul ghiacciaio.

Poiché il pluviometro dell'ARPA non è riscaldato, nei giorni in cui era presente una differenza positiva di altezza del manto nevoso rispetto al giorno precedente (ovvero veniva così evidenziato un accumulo di neve), quest'ultima è stata sommata alla precipitazione liquida misurata dal pluviometro (assumendo una densità della neve fresca appena caduta di 100 g/cm^3).

Il gradiente di precipitazione è stato calcolato utilizzando i dati di precipitazione delle stazioni meteorologiche di ARPA Lombardia di Monno, Pantano d'Avio, Edolo, Ponte di Legno e di Meteo Trentino di Passo del Tonale, e Careser. È stato assunto un gradiente medio dell'8,16 % al km e la precipitazione P è stata distribuita su ogni pixel del ghiacciaio attraverso la seguente formula:

$$P = P_a + P_a * G\% * (z - z_a) / 1000$$

In cui P_a è la precipitazione presso la stazione meteo di Pantano, $G\%$ è il gradiente di precipitazione e z e z_a sono la quota di ogni pixel del ghiacciaio e della stazione di Pantano.

La fusione potenziale della neve $SWEmp$ per ogni punto p del modello e ogni giorno d è calcolata con la seguente formula:

$$SWEmp_{p,d} = \begin{cases} PDDF * T_{a,d,p} & \text{se } T_{a,d,p} > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0 & \text{se } T_{a,d,p} \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$$

In cui $T_{a,d,p}$ è la media giornaliera della temperature dell'aria nel punto espressa in $^\circ\text{C}$, DDF è il Positive degree Day Factor originale (in accordo a Hock, 1999 e Braithwhite, 1984).

Il PDDF è stato inizialmente posto pari a $2,31 \text{ mm}/^\circ\text{C}/\text{d}$ (Bocchiola et al., 2010), ma è stato poi assunto come fattore di calibrazione del modello ed è stato modificato fino a $3,844 \text{ mm}/^\circ\text{C}/\text{d}$.

La fusione reale calcolata dal modello $SWEm$ è invece:

$$SWEm = \min [SWEmp; SWEs + SWEf],$$

Con $SWEmp$ la fusione potenziale, $SWEs$ la neve al suolo, $SWEf$ l'accumulo nevoso

L'accumulo $SWEf$ è stato assunto pari alla precipitazione solida P_s moltiplicata per il fattore c . La precipitazione solida è funzione della precipitazione totale e della temperatura: sotto una certa temperatura critica (-1°C , T_{ci}) vi è solo precipitazione nevosa, sopra un'altra temperatura critica

(posta pari a 3°C) vi è solo precipitazione liquida, mentre tra questi intervalli di temperatura la quantità di precipitazione solida varia linearmente.

Pertanto:

$$SWE_f = c * P_s$$

Con

$$P_s = P * \begin{cases} 1 & \text{se } T_a < T_{ci} \\ (T_{cs} - T_a) / (T_{cs} - T_{ci}) & \text{se } T_{ci} < T_a < T_{cs} \\ 0 & \text{se } T_a > T_{cs} \end{cases}$$

Mentre “c” è il gradiente del coefficiente di correzione della precipitazione per tenere conto della sottostima dei pluviometri. Carturan et al. (2009) hanno calcolato in accordo a Sevruck (1988) per il bacino della Mare, nel gruppo dell’Ortles, in Trentino (a circa 20 km dal bacino del Venerocolo) 1,13 per la stazione meteo di Cogolo a 1200 m slm e 1,51 per la stazione meteo di Careser a 2605 m slm, pertanto il gradiente di correzione della precipitazione sarebbe di 0,00027.

Questo parametro è stato utilizzato per calibrare il modello e si è assunto come gradiente di correzione della precipitazione 0,00027046

Inoltre, in accordo a Huss et al. (2009) ho decrementato l’accumulo linearmente dallo 0% al 100% tra 60° e 20° di pendenza, in quanto oltre il 60° la neve non si accumula e scivola verso valle, mentre tra i 20 e i 60° è soggetta a neviflusso e si accumula nelle superfici più pianeggianti.

Infine lo swe al suolo SWEs del giorno n è stato calcolato come segue:

$$SWE_s(n) = SWE_s(n-1) + SWE_f(n) - SWE_m(n)$$

in cui SWEs (n-1) è lo SWE del giorno precedente, SWEf (n) è l’accumulo del giorno stesso e SWE_m (n) è la fusione calcolata il giorno stesso.

Il modello è stato calibrato con tutti i dati misurati (ovvero i dati di neve presso trincee e rilievi nivologici il 13.6.2008 e il 12.6.2009). Il modello è stato validato tramite l’indice di Nash e Sutcliff R², pari a 0,95 (fig 19) espresso dalla seguente formula:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(SWE_{mod_i} - SWE_{meas_i})^2}{\sum(SWE_{meas_i} - SWE_{meas_m})^2}$$

In cui SWE_{mod_i} è lo SWE calcolato, SWE_{meas_i} è lo SWE misurato, SWE_{meas_m} è lo SWE misurato medio.

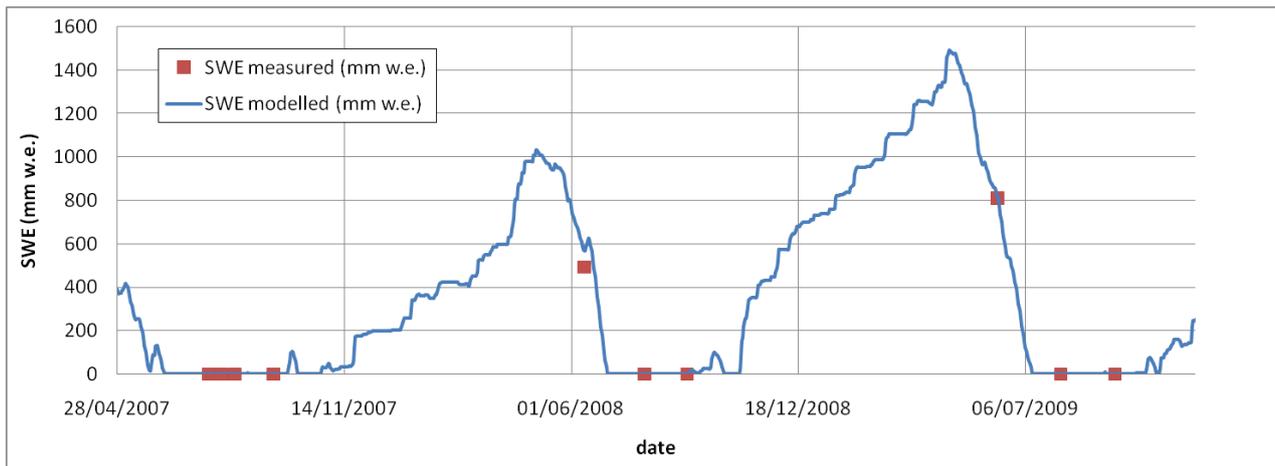


Fig 19 Andamento dello SWE nel tempo presso la stazione meteo automatica a 2743,5 m di quota. alla quota di 2743,5 m s.l.m., ovvero dove era presente la stazione meteorologica nell'estate 2007

2. Risultati

2.1 Bilancio di Accumulo

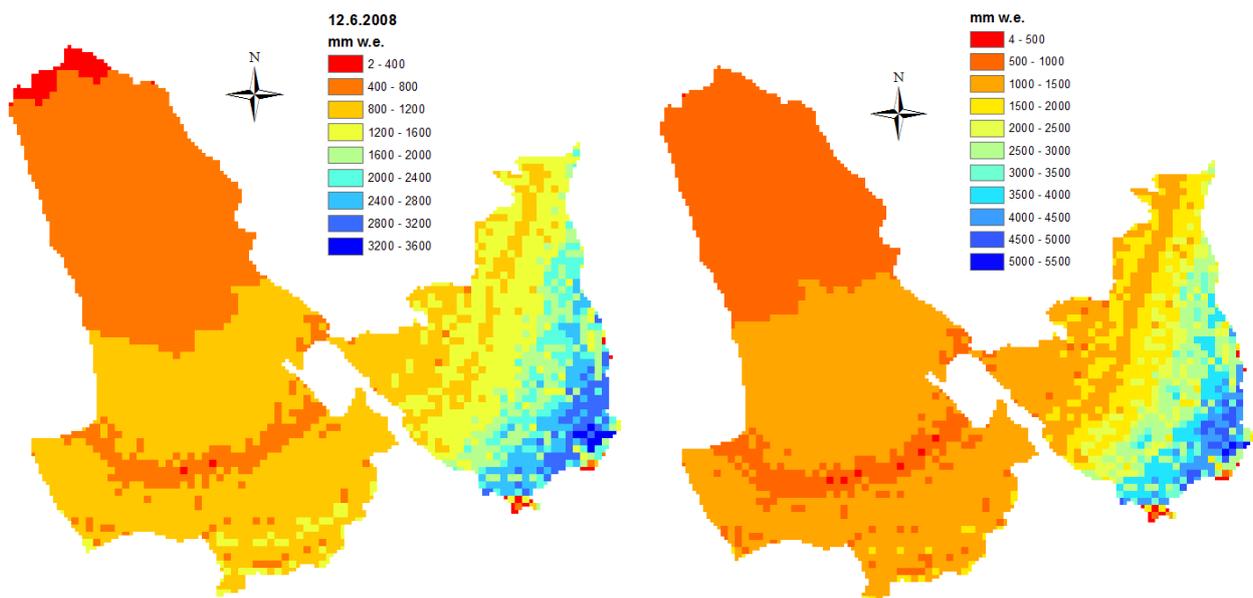


Fig 20 SWE distribuito calcolato dal modello nelle date 12.6.2008 e 12.6.2009

Il 12.6.2008 sono presenti 1,05 m we di media che variano dai 10-15 cm we delle aree sommitali ad alta pendenza e intorno ai 30-35 cm we nella parte bassa della lingua fino agli oltre 3 m we delle aree depresse a oltre 3000 m s.l.m.

Il 12.6.2009 sono presenti sul ghiacciaio in media 1,4 m we di media Che variano dai 30-40 cm we delle aree più basse (intorno ai 2700 m) agli oltre 4,6 m delle aree più depresse intorno ai 3100 m.

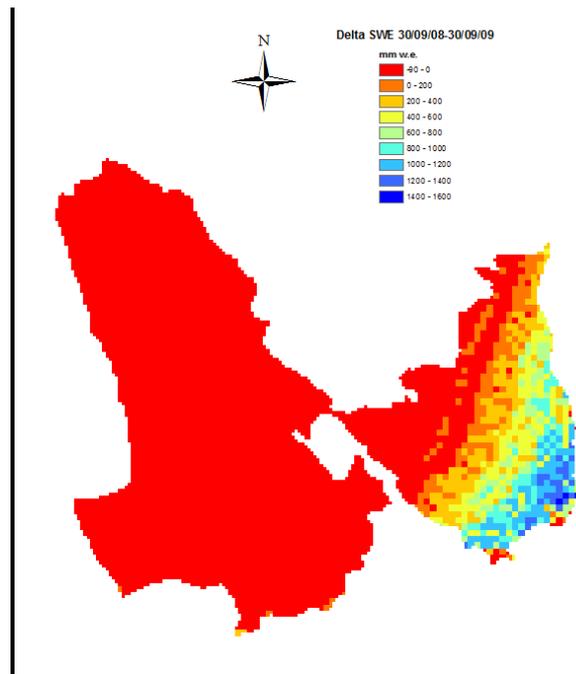


Fig 21 Variazione dello swe dal 30/9/2008 al 30/9/2009.

In tutta la zona di ablazione del ghiacciaio la variazione nevosa è leggermente negativa o stabile, mentre si hanno variazioni positive in quota.

La neve ha avuto un incremento medio di 7 cm w.e. dal 30/9/2008 al 30/9/2009, che corrisponde ad un incremento totale di $871,5 \text{ m} * 100 \text{ m}^2 = 871500 \text{ m}^3 \text{ w.e.}$

La parte bassa del ghiacciaio non subisce una variazione sostanziale di volume nevoso, ma vi sono notevoli differenze da punto a punto e si passa infatti da un decremento di -9 cm w.e. nella parte centrale (a circa 2900 m) a un incremento positivo di 1,48 m w.e. nella parte alta del ghiacciaio oltre i 3100 m di quota.

2.2 Bilancio di massa

Infine è stato calcolato il bilancio di massa del ghiacciaio dell'anno idrologico 2009 (ovvero dal 30 settembre 2008 al 30 settembre 2009) sommando la variazione nevosa all'ablazione glaciale calcolata attraverso i modelli di ablazione che hanno fornito i dati più accurati, ovvero il modello "periodi separati" per la parte debris covered e il modello moltiplicativo per la parte su ghiaccio pulito. I risultati sono mostrati in figura 22. Il ghiacciaio in quest'anno idrologico secondo questi modelli ha perso in media 76 cm, con una perdita nella parte estrema della lingua a 2650 m di 3,80 m w.e., mentre il guadagno maggiore è stato nella parte sommitale intorno ai 3100 m ove è oltre 1,30 m w.e. con punte fino a quasi 1,50 m w.e. il bilancio specifico è nullo nell'area mediana tra 2900 e 3000 m di quota. Il totale perso è stato di 950000 m³ di acqua equivalente.

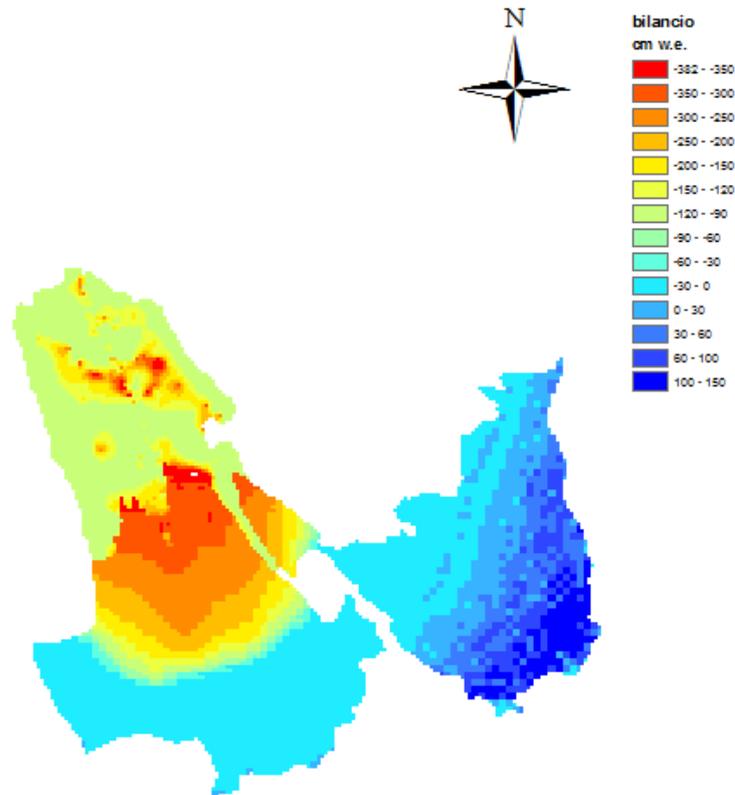


Figura 22 Bilancio di massa

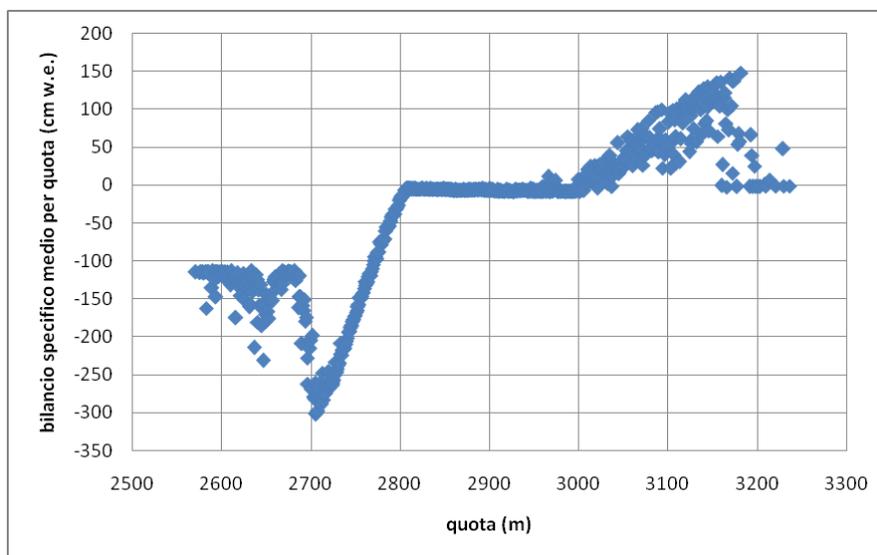


Figura 23 andamento del bilancio netto specifico mediato per quota

In figura 23 viene mostrato l'andamento del bilancio netto specifico mediato per fascia altimetrica. A quota inferiore di 2700 m vi sono grandi differenze dovute allo spessore detritico che influenza l'ablazione glaciale, poi vi è un trend di aumento con la quota tra 2700 e 2800 m, dovuto all'ablazione glaciale crescente, quindi un'area ove vi è un sostanziale pareggio di bilancio e quindi

un'area sommitale ove il bilancio dipende fortemente dalla pendenza, infatti in aree molto acclivi (anche intorno ai 60°) il bilancio tende a zero.

Bibliografia

Cazorzi e Dalla Fontana, 1996. Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index, *J. Hydrol.*, 181(1-4), 169-187

Carturan L, Cazorzi F and Dalla Fontana G (2009b) Enhanced estimation of glacier mass balance in unsampled areas by means of topographic data. *Ann. Glaciol.*, 50(50), 37–46 (doi: 10.3189/172756409787769519)

Bocchiola D., Mihalcea C., Diolaiuti G., Moscoi B., Smiraglia C., Rosso R., (2010) Flow prediction in high altitude unguaged catchments: A case study in the Italian Alps (Pantano Basin, Adamello Group), *Adw Water Resour*

Braithwaite R. J., *Calculation of degree-days for glacier-climate research*, *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.*, 20, 1984, (pp.1-20).

Hock R (1999) A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *J. Glaciol.*, 45(149), 101–111

Hock R (2005) Glacier melt: a review on processes and their modelling. *Progr. Phys. Geogr.*, 29(3), 362–391 (doi: 10.1191/0309133305pp453ra)

Huss, M., A. Bauder, M. Funk and R. Hock. 2008. Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. *J. Geophys. Res.*, 113(F1), F01015. (10.1029/2007JF000803.)

Nash and Sutcliffe, 1970

Ohmura, A. (2001). Physical basis for the temperature-based melt-index method, *J. Applied Meteorology*, 40, 753-761.

Sevruk, B. (1988), Correction of precipitation measurements, in Workshop on the Correction of Precipitation Measurements, Zurich, Switzerland, pp. 13– 23, WMO/IAHS/ETH.

Williams K. S. and Tarboton D. G., *The ABC's of snowmelt: a topographically factorized energy component snowmelt model*, *Hydrol. Process.* 13, 1905-1920 (1999)

4. Conclusioni

Per quanto riguarda la possibilità di attuare interventi attivi per ridurre la negatività dei bilanci energetici e di massa che hanno caratterizzato il glacialismo alpino ed in particolare italiano negli ultimi decenni, lo studio condotto sul Dosedé e sul Presena ha permesso verificare l'efficacia di questa strategia di "protezione glaciale attiva" nel mitigare le perdite stagionali del ghiacciaio.

Per il Dosedé, dove è stata attuata la sperimentazione su una parcella di limitate dimensioni nel 2009, facendo seguito ad un primo esperimento del 2008, ci si è posti il problema iniziale di meglio conoscere entità e distribuzione dei flussi energetici alla superficie del ghiacciaio e di comprendere meglio l'azione di protezione esercitata dal telo, nonché le caratteristiche meteorologiche dominanti nella stagione ablativa (sia 2008 che 2009). A questo proposito si sono analizzati i dati della stazione meteorologica funzionante sul Ghiacciaio del Dosedé dal 2007 e posizionata nei pressi della copertura (il problema della omogeneizzazione dei dati meteo-climatici è stato affrontato in un'apposita appendice). Le temperature medie estive dell'estate 2009 sono risultate maggiori rispetto a quelle dell'estate 2008, sia su scala giornaliera che su scala oraria.

A ulteriore contributo della quantificazione dei flussi termici in grado di raggiungere la neve ed il ghiaccio sottoposti a protezione sono stati utilizzati dei sensori di temperatura (termistori e data logger) posizionati nella neve a contatto con la superficie del geotessile e all'interno della neve sottoposta a protezione: questi, confrontati con i dati termici dell'aria registrati alla stazione meteorologica Dosedé, hanno evidenziato che la temperatura dell'aria risulta quasi sempre maggiore delle temperature del telo e della neve sottostante. L'azione del telo non si è esplicata quindi solamente nell'impedire la penetrazione della radiazione solare (e soprattutto della radiazione UV altamente energetica) e nello smorzare la penetrazione termica ma anche nel ridurre il numero di ore durante le quali la neve sarebbe stata sottoposta a temperature tali da promuoverne maggiormente la fusione. Si è inoltre quantificato il bilancio energetico superficiale sia della superficie glaciale naturale (presso la stazione meteorologica) sia presso il geotessile e si sono confrontati i valori di energia assorbiti e la fusione potenziale nei due casi. Confrontando i risultati con quelli dell'anno precedente si può concludere che la perdita nevosa e di ghiaccio nel 2009 è stata superiore a quella del 2008 a causa di una stagione di ablazione mediamente più calda e in particolare di un inizio estate meno fresco di quello dello scorso anno.

Il Ghiacciaio Dosd     stato oggetto anche di altri rilievi che hanno portato al calcolo del bilancio di massa distribuito attraverso un apposito modello (estate 2011) e alla realizzazione di un modello di deflusso che   stato calibrato con dati di deflusso misurati in alveo.

Per quanto riguarda il bilancio di massa netto distribuito del Ghiacciaio del Dosd   si sono utilizzati dati meteorologici della AWS sopragliaciale per calibrare e validare il modello. Il bilancio   risultato nettamente negativo (-1288 mila metri cubi w.e. con bilancio specifico netto di -1,58 w.e.). Per quanto riguarda il modello di deflusso nonostante non si abbiano informazioni specifiche su tipo di suolo, permeabilit , umidit , vegetazione, radiazione, e pertanto risulta difficile stimare gli apporti del deflusso superficiale che vengono persi attraverso l'evapotraspirazione e l'infiltrazione,   stato possibile studiare il bilancio idrologico di bacini con aree glacializzate e nelle quali il contributo nivale e glaciale al deflusso, specie nella stagione tardo primaverile ed estiva, costituiscono la fonte predominante del deflusso.

A proposito del Presena per meglio comprendere i meccanismi di azione del geotessile, il bilancio energetico radiativo   stato calcolato per il ghiacciaio in condizioni non modificate e per l'area coperta con il geotessile durante un periodo campione (estate 2011). L'analisi dei dati radiativi ha permesso di descrivere l'albedo caratterizzante il geotessile e di confrontarla con quella del ghiacciaio in condizioni non modificate. In media presso il telo l'assorbimento di energia solare   stato del 36% mentre la superficie non modificata del ghiacciaio ha assorbito in media il 57% dell'energia solare. Questa differenza   ovviamente da attribuire all'azione del telo riduce l'assorbimento solare; diversamente la superficie naturale del ghiacciaio vede la progressiva modificazione delle condizioni della neve e pertanto riduce via via la sua albedo sino a raggiungere i valori propri del ghiaccio di ghiacciaio.

L'azione del telo nel modulare i flussi energetici radiativi assorbiti dal ghiacciaio ha portato ad una riduzione dell'ablazione del 48%. Complessivamente il risultato della sperimentazione eseguita sul Presena   pi  che soddisfacente e suggerisce di continuare in futuro l'applicazione di questo tipo di strategia per mitigare le perdite stagionali dell'accumulo nevoso sul ghiacciaio e contribuire a ridurre la negativit  dei bilanci di massa.

Sullo stesso ghiacciaio durante l'estate 2012 si   anche provveduto alla sperimentazione di tipi di geotessile diversi rispetto a quelli precedentemente utilizzati, sempre per verificarne l'efficacia.

In particolare sono stati testati materiali a diversa composizione (ad esempio teli biologici) e diverso spessore e peso per unit  di area. Lo scopo era verificare quanto la composizione

influenzi l'efficacia protettiva del telo e quanto lo spessore sia determinante e testare l'usura stagionale dei singoli materiali per verificare quali possano venire riutilizzati per più anni successivi limitando i costi e l'impatto sull'ambiente. La riduzione della fusione di neve e ghiaccio è stata in tutti i casi superiore al 60% ed è stata più bassa nei teli di minore spessore e di materiale biologico (63%). Più elevate le percentuali di riduzione della fusione per i teli di maggiore spessore, che hanno superato l'80%. Questi valori elevati sono probabilmente sovrastimati a causa delle difficoltà di raccolta dei dati, ma indicano senza dubbio l'elevata capacità di protezione dei teli di maggiore spessore.

E' stato inoltre studiato il bilancio di massa e in particolare di ablazione del Ghiacciaio del Venerocolo. Per quanto riguarda l'ablazione sono stati applicati dei modelli degree day distribuiti che calcolano l'ablazione in funzione della temperatura dell'aria, della radiazione e dello spessore detritico. Sono stati confrontati i diversi modelli che considerano tutti i dati dell'estate insieme o separatamente che meglio descrivono la fusione glaciale.

È stato inoltre implementato un semplice modello per lo studio della fusione e dell'accumulo nivale per poter valutare il bilancio di massa del Ghiacciaio del Venerocolo.